

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ СПЛАВА 1424 (Al-Mg-Li-Zn) ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПУЧКОВ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ

В.В. Овчинников<sup>1)</sup>, С.М. Можаровский<sup>1)</sup>, Н.В. Гущина<sup>1)</sup>, Ф.Ф. Махинько<sup>1)</sup>,  
Л.И. Кайгородова<sup>2)</sup>, Н.И. Колобнев<sup>3)</sup>, Л.Б. Хохлатова<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Институт электрофизики УрО РАН,

ул. Амундсена, 106, Екатеринбург, 620016, Россия, viae05@rambler.ru

<sup>2)</sup>Институт физики металлов УрО РАН,

ул. Софьи Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620219, Россия

<sup>3)</sup>ФГУП «ВИАМ», ул. Радио, 17, Москва, 105005, Россия

Экспериментально доказана возможность радиационного отжига холоднодеформированных полос толщиной до 7.3 мм трудно поддающегося термическому отжигу сплава 1424 системы Al-Mg-Li-Zn при одностороннем облучении пучками ускоренных ионов  $Ag^+$  (при проективном пробеге внедряемых ионов, составляющем всего лишь несколько десятков нанометров). Установлен диапазон энергий ионов, флюенсов и плотностей ионного тока, обеспечивающих необходимые по техническому регламенту свойства алюминиевых полуфабрикатов из сплава 1424 для их рулонной прокатки. Радиационный отжиг обеспечивает высокую скорость процесса, а также высокую однородность структуры и свойств металла.

### Введение

Алюминиевый сплав 1424 (Al-Mg-Li-Zn), разработанный в ФГУП «ВИАМ» (г. Москва), относится к сплавам третьего поколения. Сплав имеет пониженную плотность ( $2.54 \text{ г/см}^3$ ), повышенные характеристики вязкости разрушения и трещиностойкости по сравнению с ранее разработанным сплавом 1420 и является альтернативой сплаву 1163-Т. Он характеризуется также повышенной удельной прочностью [1].

Серьезной проблемой является то, что холоднодеформированный сплав 1424 не восстанавливает свою пластичность в результате термического отжига до уровня, необходимого для его дальнейшей прокатки. Для восстановления пластичности этого сплава используют сложные технологические операции, включающие закалку в селитровой ванне карточным методом.

В связи с этим является актуальной разработка технологии быстропотекающего холодного радиационного отжига сплава 1424 мощными пучками ускоренных ионов, допускающей в перспективе возможность промышленной рулонной холодной прокатки этого сплава.

### Основная часть

Листы сплава 1424 толщиной 7.3 мм были получены в результате холодной прокатки на Каменск-Уральском металлургическом заводе. Для проведения экспериментов по облучению из этих листов были приготовлены образцы размером  $45 \times 35 \times 7.3 \text{ мм}$  с таким расчетом, чтобы в дальнейшем из них можно было изготовить по 3 образца для испытаний на одноосное растяжение.

Облучение мишеней из сплава 1424 осуществляли ионами  $Ag^+$  в непрерывном режиме на установке для ионно-лучевой имплантации ИЛМ-1, оснащенной технологическим ионным источником «ПУЛЬСАР-1М» на основе тлеющего разряда низкого давления с холодным полым катодом [2]. Температуру образцов в ходе облучения контролировали с помощью тонких хромель-алюмелевых термопар. Параметры облучения сплава 1424 ионами аргона с энергией 40 кэВ приведены в табл. 1. Указаны максимальные

температуры, до которых образцы непрерывно нагревались в ходе применявшихся режимов облучения (после чего сразу охлаждались без выдержки при этих температурах).

Таблица 1. Параметры облучения сплава 1424 ионами аргона с энергией 40 кэВ.

№ обр.	Плотность ионного тока $j$ , $\text{мкА/см}^2$	Флюенс $\Phi$ , $\text{см}^{-2}$	Время облучения, с	$T$ , $^{\circ}\text{C}$
1	200	$5 \cdot 10^{16}$	42	120
2		$10^{17}$	83	200
3		$3.7 \cdot 10^{17}$	293	400
4		$4.5 \cdot 10^{17}$	358	450
5	400	$3 \cdot 10^{17}$	121	450

С целью прямого сравнения характера влияния на структуру сплава *ионного облучения* и *обычного нагрева* в том же температурном режиме (в отсутствие облучения) наряду с обработкой ионным пучком использовали муфельную печь.

Оптическую металлографию проводили на микроскопе «Neophot-21», статические испытания на одноосное растяжение были выполнены в ЦЗЛ ОАО «КУМЗ» в соответствии с ГОСТ 1497-84. Просвечивающую электронную микроскопию осуществляли на электронном микроскопе JEM-200 CX. Структуру образцов изучали в двух сечениях: параллельном облучаемой поверхности (на расстоянии 150 мкм от нее) и перпендикулярном к ней (по всей толщине образца).

В табл. 2 представлены результаты механических испытаний холоднодеформированных и облученных образцов сплава 1424. Из этих данных видно, что при одностороннем облучении холоднодеформированных пластин толщиной 7.3 мм сплава 1424 относительно низким флюенсом ( $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ) ионов аргона с энергией 40 кэВ при плотности ионного тока  $200 \text{ мкА/см}^2$  (время облучения 42 с) происходит снижение предела прочности  $\sigma_b$  на 43 МПа. При этом предел текучести  $\sigma_{0.2}$  увеличивается (на 63 МПа), относительное удлинение  $\delta$  изменяется незначительно.

Увеличение флюенса до  $10^{17}$  см<sup>-2</sup> приводит к еще большему снижению предела прочности, предел текучести при этом возвращается к исходному значению, относительное удлинение возрастает до 11.5 %. При дальнейшем увеличении флюенса до  $3.7 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> (длительность облучения 5 мин) сплав продолжает разупрочняться: предел прочности достигает значения 392 МПа, предел текучести – 264 МПа, а относительное удлинение – 13.7 %.

Таблица 1. Механические свойства сплава 1424 в исходном состоянии и после облучения в различных режимах.

№ обр.	Механические свойства		
	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %
Исходный, без облучения	514	351	4.7
1	471	414	6.2
2	425	354	11.5
3	392	264	13.7
4	389	181	20.8
5	391	181	17.8

Максимальное разупрочнение в сочетании с максимальным относительным удлинением имеет место при облучении флюенсом  $\Phi = 4.5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> (время облучения составляет 6 мин):  $\sigma_B = 389$  МПа,  $\sigma_{0.2} = 181$  МПа,  $\delta = 20.8$  %, при этом снижается лишь предел текучести (по сравнению с облучением предыдущим флюенсом), предел же прочности более практически не изменяется и составляет 389 МПа.

Увеличение плотности ионного тока в 2 раза до 400 мкА/см<sup>2</sup> позволило сократить время облучения до 120 с (2 мин), что, несмотря на более низкое значение флюенса:  $3 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup>, обеспечивает близкий уровень разупрочнения:  $\sigma_B = 390$  МПа,  $\sigma_{0.2} = 181$  МПа,  $\delta = 17.8$  %. Достигаемый в результате кратковременного облучения уровень свойств сплава соответствуют регламентированным значениям ( $\sigma_B = 370$  МПа,  $\sigma_{0.2} = 220$  МПа,  $\delta = 15-18$  %), гарантирующим возможность его холодной прокатки.

С помощью металлографического анализа установлено, что для микроструктуры сплава 1424 в исходном холоднодеформированном состоянии характерна строчечная структура, указывающая на наличие вытянутых тонких зерен. После облучения в оптимальном режиме регистрируется уширение деформационных полос, а также формирование в отдельных участках как равноосных, так и вытянутых зерен внутри исходных, образующих цепочки, параллельные поверхности листа. Это свидетельствует о том, что *под действием* облучения в сплаве протекают процессы *рекристаллизации*.

Следует отметить, что структурные изменения в сплаве 1424 под воздействием облучения ионами  $Ag^+$  с энергией 40 кэВ при плотностях ионного тока 200 и 400 мкА/см<sup>2</sup> и флюенсах  $3 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> и более, происходят *по всей толщине* образца. Такой вывод сделан на основе анализа микроструктуры облученных образцов в *поперечном* сечении с *облученной* и *необлученной* сторон

образцов, а также в их центральной части. Микроструктура достаточно *однородна* по толщине.

С помощью электронно-микроскопических исследований также было установлено, что при поверхностном облучении ионами  $Ag^+$  ( $E = 40$  кэВ,  $j = 200$  и  $400$  мкА/см<sup>2</sup>, диапазон флюенсов:  $\Phi = (3-4.5) \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup>) во всем объеме образцов холоднодеформированного сплава 1424 толщиной 7.3 мм протекают процессы *рекристаллизации*, проявляющиеся в зависимости от режима облучения либо в уширении деформационных полос, либо в формировании равноосной зеренной структуры с размером зерен 2-6 мкм (рис. 1).

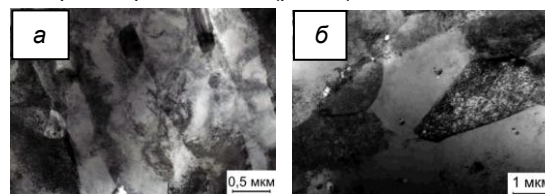


Рис. 1. Результаты электронно-микроскопического исследования микроструктуры сплава 1424 после холодной деформации (а) и после облучения ионами аргона в режиме:  $E = 40$  кэВ,  $j = 400$  мкА/см<sup>2</sup>,  $\Phi = 3 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> (б); центральная часть образца.

Кроме того, под действием облучения снижается *плотность зернограничных* выделений, а также *измельчаются интерметаллиды*  $Al_6Mn$ . Все это приводит к увеличению пластичности сплава. При облучении происходит также образование мелких частиц метастабильной  $\delta'$ -фазы ( $Al_3Li$ ) диаметром  $\sim 10-15$  нм, но плотность их распределения настолько мала, что не влияет на возможность дальнейшей холодной прокатки сплава на 20-30 % (в отличие от высокой плотности этой фазы после проведения печного отжига, не обеспечивающего восстановление пластичности сплава 1424).

Таким образом, установлено, что облучение холоднодеформированного сплава 1424 ионами  $Ag^+$  энергией 40 кэВ при флюенсах  $3 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> и более обеспечивает протекание в нем процессов рекристаллизации, снижения размера и плотности зернограничных выделений и измельчения интерметаллидов кристаллизационного происхождения во всем объеме образцов толщиной 7.3 мм. Это приводит к существенному разупрочнению сплава.

Полученный в результате кратковременного облучения сплава пучками ускоренных ионов *уровень свойств* соответствует *регламентированному уровню*, при котором сплав может быть подвергнут холодной прокатке. При этом время облучения значительно меньше длительности разупрочняющего отжига (1-2 ч) и составляет всего лишь 2-5 мин. Следует отметить, что в ходе облучения осуществляется кратковременный непрерывный разогрев образцов ионным пучком до 450°C без выдержки при этой температуре (см. рис. 2б).

Эксперименты по нагреву холоднодеформированных образцов сплава 1424 в муфельной печи (при точном воспроизведении режима нагрева таких же образцов ионным пучком) показали, что кратковременный термический отжиг не

приводит к каким-либо существенным изменениям структуры холоднокатанных образцов сплава 1424 (рис. 2).

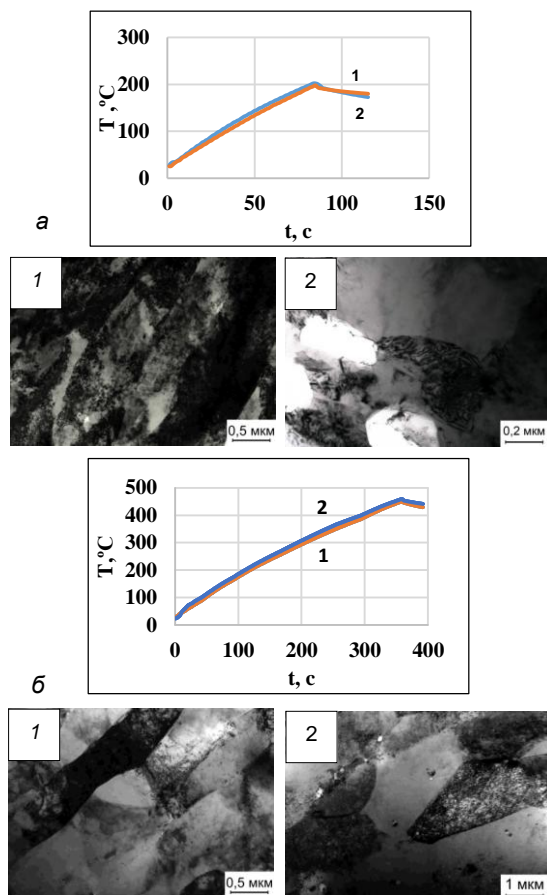


Рис. 2. Сравнение результатов печного и радиационного отжига образцов холоднотермически деформированного сплава 1424 при практически полном совпадении теплового режима обработки (кривых  $T(t)$ ): а, б – нагрев образцов сплава 1424 до различных температур (в печи 1 и ионным пучком 2). Микроструктура:  $T_{\text{max}}=200^\circ\text{C}$ : а(1) – полосы скольжения (нагрев в печи), а(2) – субзернистая структура (обработка ионным пучком);  $T_{\text{max}}=450^\circ\text{C}$ : б(1) – полосы скольжения (нагрев в печи), б(2) – рекристаллизованная структура (обработка ионным пучком).

Эти данные свидетельствуют о решающей роли радиационно-динамического воздействия [3]

пучков ионов на исследуемый сплав.

На основе результатов проведенных исследований в работе была выполнена холодная прокатка листов сплава 1424 с использованием ионно-лучевой обработки вместо трудоемких технологических операций выдержки в селитровой ванне (аналогичных нагреву под закалку). На рис. 3 показан исходный образец толщиной 7.3 мм и образцы, подвергнутые холодной прокатке после кратковременных, в течение нескольких десятков секунд, разупрочняющих радиационных отжигов; толщина образцов: 1 – 2.4 мм; 2 – 1.6 мм; 3 и 4 – 1.2 мм.

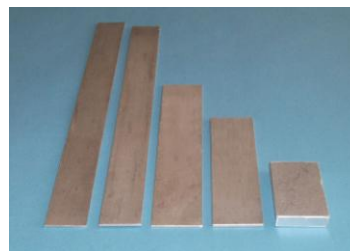


Рис. 3. Результаты холодной прокатки образца толщиной 7.3 мм сплава 1424 (Al-Mg-Li-Zn) до толщины 1.2 мм с промежуточными радиационными отжигами.

### Закключение

Установлено, что облучение ионами  $\text{Ar}^+$  с энергией 40 кэВ холоднотермически деформированного сплава 1424 (дозами  $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  и более) обеспечивает протекание процессов рекристаллизации во всем объеме образцов толщиной 7.3 мм. Полученный в результате кратковременного облучения уровень свойств соответствует регламентированному уровню, при котором сплав может быть подвергнут холодной прокатке. При этом время облучения значительно меньше длительности разупрочняющего отжига (1-2 ч) и не превышает нескольких минут.

Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ (грант № 14-08-01049\_A).

### Список литературы

1. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: МИСИС, 2001. 416 с.
2. Гаврилов Н.В., Никулин С.П., Радковский Г.В. // ПТЭ. 1996. № 1. С. 93-98.
3. Овчинников В.В. // УФН. 2008. Т. 178. № 9. С. 991-1001.

## PLASTICITY RESTORATION OF THE 1424 ALLOY (Al-Mg-Li-Zn) UNDER THE ACTION OF ACCELERATED ION BEAMS

V.V. Ovchinnikov<sup>1)</sup>, S.M. Mozarovskiy<sup>1)</sup>, N.V. Gushchina<sup>1)</sup>, F.F. Makhinko<sup>1)</sup>,  
L.I. Kaigorodova<sup>2)</sup>, N.I. Kolobnev<sup>3)</sup>, L.B. Hohlatova<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Institute of Electrophysics, UB RAS, 106, Amundsena St., Yekaterinburg, 620016, Russia, viae05@rambler.ru

<sup>2)</sup>Institute of Metal Physics, UB RAS, 18, S. Kovalevsky St., Yekaterinburg, 620219, Russia

<sup>3)</sup>FSUE «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials»  
17, Radio St., Moscow, 105005, Russia

The possibility of radiation annealing was experimentally proved using cold-worked bars to 7.3 mm thick and made of hard-to-thermally-annealed 1424 alloy of the Al-Mg-Li-Zn system irradiated from one side with beams of accelerated  $\text{Ar}^+$  ions (at an average projective range of penetrating ions of only a few tens of nanometers). The ranges of ion energy, fluence, and ion current density were established, within which the necessary technical requirements to the properties that are necessary for roll rolling of aluminum semi-finished products prepared from the 1424 alloy are met. Radiation annealing provides a high rate of the process and the high uniformity of the structure and properties of the metal.